

ТРЕБОВАНИЯ К ИНФРАСТРУКТУРЕ сетей связи в составе Smart Grid

М.Басараб, д.ф.-м.н., зав. кафедрой

"Информационная безопасность" МГТУ им. Н.Э.Баумана,

Р.Бельфер, к.т.н., доцент кафедры

"Информационная безопасность" МГТУ им. Н.Э.Баумана / a.belfer@yandex.ru,

Е.Глинская, ст. преподаватель кафедры

"Информационная безопасность" МГТУ им.Н.Э.Баумана

Н.Якушева, ст. преподаватель кафедры

"Информационная безопасность" МГТУ им. Н.Э.Баумана

УДК 621.392, DOI: 10.22184/2070-8963.2018.73.4.40.46

Представлена концептуальная модель интеллектуальной электроэнергетической системы; проведен анализ требований к характеристикам сетей связи в части информационной безопасности и надежности одной из основных подсистем Smart Grid – усовершенствованной инфраструктуры показаний счета.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия во многих странах модернизируется существующая энергетическая система. Актуальность этой модернизации возрастает с повышением потребности в использовании электроэнергии и, как следствие, увеличением выброса в атмосферу углекислого газа, мировым потеплением.

Будем называть существующую энергосистему ЭС. Замена существующей энергосети более экономным использованием электроэнергетики будущего получило название "умной сети" (smart grid), что в русскоязычной интерпретации соответствует понятию "интеллектуальная электроэнергетическая система (ИЭС)". Существуют различные определения ИЭС. Все они сводятся к модернизации по двум основным аспектам, которые взаимосвязаны: силовые элементы для производства, передачи, распределения, накопления и потребления электроэнергии (часто это связывают с интеграцией в ИЭС с возобновляемыми источниками энергии и другими мерами); современные двусторонние сети связи, позволившие автоматически выполнять многие функции управления, мониторинга и др. [1].

В Китае, США, Европейском Союзе (ЕС) и некоторых других странах существуют десятки пилотных проектов, где применение ИЭС дает существенный выигрыш потребителю в оплате услуг энергетических организаций. В [2, 3] приводятся отчеты ЕС о состоянии реализации ИЭС за 2011 и 2013 годы.

В России работа в этом направлении активизировалась несколько позже, отмечают российские специалисты в предисловии к изданию на русском языке книги немецких авторов [4]. В 2011 году в РФ были приняты основные положения концепции ИЭС РФ [5]. Результаты моделирования развития ЕЭС России на период до 2030 года с учетом перехода к ИЭС ААС выполнены в ИНЭИ РАН на основе переноса американского опыта оценки эффективности Smart Grid (EPRI, США). Под активно-адаптивной сетью (ААС) понимается ИЭС, в которой все субъекты электроэнергетического рынка (генерация, сеть связи, потребители) принимают активное участие в процессах передачи и распределения электроэнергии.

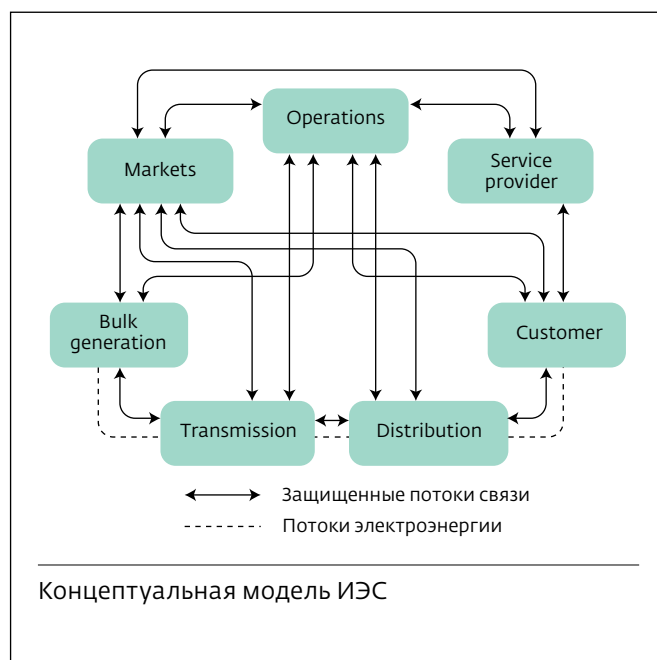
В этом документе приводятся расчеты, которые показывают большие экономические выгоды

от реализации проекта ИЭС в масштабе России. Результаты экономического эффекта (с учетом затрат на сети связи) в млрд. руб. (на 2010 год) приведены в Концепции ИЭС России: до 2020 года – 716 млрд; в 2021–2025 гг. – 1172 млрд; в 2026–2030 гг. – 1560 млрд; до 2030 года – 3448 млрд.

Согласно утвержденной Распоряжением Правительства от 3 апреля 2013 года 511-р (с изменениями на 29 ноября 2017 года) Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации, "в течение ближайших 10–15 лет России предстоит внедрять технологии, которые уже используются в сетевых комплексах развитых стран. В частности, предстоит внедрять технологии "умных" электрических сетей, позволяющих повысить пропускную способность и стабильность энергоснабжения, сократить потери и издержки на технический и коммерческий учет у потребителя" [6].

В программе ЕС по созданию ИЭС уделяется большое внимание необходимости проведения научно-технических исследований в области использования систем связи. В последние годы зарубежными специалистами опубликовано много статей и книг по ИЭС, включая работы по вопросам обеспечения характеристик входящих систем, использующих различные технологии сетей связи (надежность, информационная безопасность, задержка сообщений, пропускная способность и др.). По сравнению с категорией сетей связи общего пользования для сетей ИЭС больше типов характеристик, и требования к их количественным показателям более высокие. В частности, эти требования к информационной безопасности (ИБ) вызваны потенциально возможными большими потерями при реализации угроз безопасности. Здесь уместно напомнить: в соответствии с классификацией, принятой в Федеральном законе "О связи" [7], энергетические сети относятся к категории технологических. При этом в законе отмечается, что они могут быть присоединены к технологическим сетям связи иностранных организаций только для обеспечения единого технологического цикла. Для сетей связи в ИЭС требования к ИБ и другим показателям так же высокие, как и для сетей связи категории специального назначения.

Настоящая статья посвящена анализу ряда зарубежных публикаций, на основе которого сформулированы некоторые из основных требований к инфраструктуре сетей связи в составе интеллектуальной энергосистемы Smart Grid. При этом авторы фокусируются на одной из ключевых составляющих ИЭС – усовершенствованной



инфраструктуре показаний счета AMI (Advanced Metering Infrastructure). Изучение и анализ научно-практических работ в части систем связи ИЭС могут быть использованы студентами кафедры "Информационная безопасность" МГТУ им. Н.Э.Баумана, которые разрабатывают учебно-лабораторный стенд сети передачи данных категории специального назначения [8–10].

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИЭС

На рисунке приведена одобренная международными организациями концептуальная модель ИЭС [2, 11, 12], состоящая из семи логических доменов. Здесь показаны: семь доменов, каждый из которых включает две группы – исполнитель (приборы, системы, программы или люди, которые принимают решения или обмениваются информацией для исполнения) и применение (исполненные задачи исполнителем); двусторонние потоки электроэнергии между первыми четырьмя доменами; двусторонние защищенные от угроз безопасности информационные потоки сетей связи каждого из семи доменов.

Приведем название каждого домена, его назначение и выполняемые им функции.

- Bulk Generation: исполнитель – генератор электричества в большом количестве; применение – выработка электроэнергии, управление ресурсами и др.
- Transmission: исполнитель – передача большого количества электричества от генератора на большие расстояния; применение – мониторинг

и управление системами, стабильность, оптимальность и др.

- **Distribution:** исполнитель – распределитель электричества потребителям и от потребителей; применение – автоматические подстанции, контроль, запись, управление ресурсами и др.
- **Customer:** исполнитель – конечный пользователь электричеством; применение – автоматизация в жилых домах и офисах, солнечная/ветряная генерация электричества и др.
- **Service Provider:** исполнитель – провайдер услуг, обеспечение услугами пользователей электричества и утилитами; применение – управление пользователем, установление и управление домашними приборами, биллинг и др.
- **Operations:** исполнитель – операции по передаче электричества; применение – обеспечение безопасной и надежной работы энергосистемы (мониторинг, управление, анализ, поддержка потребителя и др.).
- **Markets:** исполнитель – операторы и участники в маркетинге электричества; применение – управление маркетингом, рыночная торговля, коммерция и др. В работе [4] рассматриваются восемь различных бизнес-моделей, использование которых может привести к экономической выгоде от эксплуатации электростанций.

АРХИТЕКТУРА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПОКАЗАНИЙ СЧЕТА АМІ

АМІ состоит из инфраструктуры связи и двух оконечных систем – интеллектуальных счетчиков SM (Smart Meter) на оконечной стороне потребления электроэнергии и программной системы расчета данных потребления электроэнергии MDMS (Meter Data Management System) на другой оконечной стороне. MDMS проводит вычисления зарегистрированной информации интеллектуальных счетчиков. Эти вычисления используются для расчета биллинга, проведения аудита и других задач управления и администрирования.

Архитектура сетей связи АМІ представляет трехуровневую структуру, в каждой из которых используется одна или несколько сетей связи разных технологий. Нижним уровнем является сеть домашней зоны HAN (Home Area Network), включающая данные потребления электроэнергии в одном здании; средним – NAN (Neighborhood Area Network), сеть небольшого района, включающая данные потребления электроэнергии нескольких HAN; глобальным – WAN (Wide Area Network), включающая данные потребления электроэнергии города или пригорода и получающая

эти данные от нескольких NAN. Рассмотрим три этих уровня подробнее.

Сеть HAN. В ИЭС используется модернизированный интеллектуальный счетчик SM (Smart Meter) потребления приборами электроэнергии в ватт-часах. SM подключен к автоматическому показателю счетчика AMR (Automatic Meter Reading), который периодически производит замеры потребления энергии и отправляет эти данные по сети связи АМІ в систему биллинга. При этом используется односторонняя связь. АМІ осуществляет сбор данных потребления энергии от многих SM, анализ их и хранение. По результатам этого анализа АМІ сможет направлять (используя двустороннюю связь по сети связи в другую сторону) пользователям команды управления: изменение режима нагрузки потребления, оповещение об изменении цены (например, в ночное время при низкой нагрузке понижение цены). На основе полученных команд потребитель могут регулировать потребление электроэнергии. В ИЭС предусмотрено использование и других команд управления – например, переключение из режима потребления в режим генерации электроэнергии от возобновляемых источников питания (ветряные мельницы, солнечные батареи) и др.

Приведенные выше положения относятся к инфраструктуре сети HAN, которая оперирует на малом расстоянии (десятки метров) и с малой скоростью сетей связи (сотни бит в секунду). Пользователями энергии являются бытовые домашние приборы и другие устройства (например, электромобиль). В зарубежных работах рассматривается возможность реализации HAN на разных технологиях сетей связи – ZigBee, Ethernet, IEEE 802.11. К сетям HAN относятся также сети офисных зданий BAN (Building Area Network) и промышленные сети IAN (Industrial Area Network). Многие создатели ИЭС в качестве основной технологии сети связи для HAN приняли ZigBee [13]. ZigBee является самоорганизующейся сетью, она ориентирована на приложения, требующие гарантированной безопасной передачи данных при относительно небольших скоростях, поддерживает не только простые топологии сети ("точка-точка", "дерево" и "звезда"), но ячеистую (mesh) топологию с ретрансляцией и маршрутизацией сообщений. В работе [13] рассматривается использование беспроводных сетей связи группы стандартов IEEE 802.11-802.11a, 802.11g, 802.11n.

Сеть NAN. Для выполнения функций мониторинга потребления энергии и выполнения управления миллионами пользователей всех сетей HAN

необходимо обеспечить подключение всех пользователей всех HAN к магистральной сети. Эту функцию выполняет AMI в сети зоны NAN. Несколько HAN подключено к одной NAN и передают данные потребляемой электроэнергии. Некоторые сообщения (данные стоимости, команды управления) из NAN передаются в обратном направлении. NAN оперирует на расстоянии сотен метров (несколько городских зданий) со скоростью сетей связи до 2 кбит/с). Эти данные через шлюз NAN передаются в магистральную сеть.

В домене Distribution NAN в ИЭС с помощью средств связи распределяет электроэнергию между доменами Transmission и каждым подключенным к нему HAN домена Customer. С помощью мониторинга и управления доставкой электроэнергии учитываются спрос каждого потребителя и готовность его выполнить.

NAN напрямую соединена со всеми пользователями подключенных HAN, образуя наиболее важный сегмент, который может определять эффективность всей энергосистемы. NAN может быть реализован на разных технологиях – беспроводных mesh-сетей WMN (Wireless mesh network) стандарта 802.11s, сотовых сетей связи и др. Многие создатели ИЭС в качестве основной технологии сети связи для NAN приняли WMN [14, 15]. Для WMN характерен принцип самоорганизации построения архитектуры, самоконфигурации, самовосстановления, высокой масштабируемости и надежности [16].

Сеть WAN. Глобальная сеть является магистралью, обеспечивающей соединение между множеством NAN и центром управления, обрабатывающим и анализирующим поток данных счетчиков потребления электроэнергии. Центр управления MDMS производит расчет данных потребления электроэнергией, вычисляя зарегистрированную информацию интеллектуальных счетчиков. Эти вычисления используются для расчета биллинга,

проведения аудита и других задач управления и администрирования.

Глобальную сеть WAN можно рассматривать как состоящую из полной городской/пригородной зоны, взаимодействующей с NAN. Сети WAN формируют магистральные линии связи между сетями NAN и управляющими центрами. WAN может быть реализована на технологиях волоконно-оптической сети связи или сотовых сетей связи, 3G, 4G [17]. WAN может охватывать площадь в несколько тысяч квадратных километров и обеспечивать скорость передачи данных от 10 Мбит/с до нескольких Тбит/с. Отечественная разработка технологии уплотненного волнового мультиплексирования DWDM (Dense Wave Division Multiplexing) позволяет передавать данные на скоростях Тбит/с, обеспечивая при этом информационную безопасность [18].

НЕКОТОРЫЕ ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ AMI

Во-первых, в ИЭС используется большее количество сенсоров и актюаторов (команд управления), чем в существующих ЭС. В отличие от сенсоров, актюатор передает по каналам связи не данные мониторинга потребления электроэнергии, а управляющие сообщения различного назначения. Сенсоры используются для сбора данных и обмена информацией между устройствами и центрами обработки данных. Актюаторы используются для оптимального управления всеми компонентами энергосистемы.

Во-вторых, достигается уменьшение пикового спроса на электроэнергию без снижения качества обслуживания – например, установлением режима с помощью сообщений управления по сетям связи между потребителями электроэнергии и устройствами поставки. Такими сообщениями могут устанавливаться режим пикового периода (максимальной нагрузки on-peak), незначительной (off-peak) или средней (mid-peak)

нагрузки. Из-за непостоянного характера потребности в электроэнергии баланс спроса и потребления регулируется стоимостью за потребление. В США цена за кВт/ч в течение обычных периодов может быть в десятки раз меньше, чем в часы пик.

В-третьих, мониторинг потребления электроэнергии с помощью АМІ через короткие периоды времени (секунды для предприятий и минуты для домашних хозяйств) позволяет получить более точные данные биллинга и зафиксировать изменение состояния нагрузки, что приносит дополнительно экономию в электроснабжении.

В-четвертых, АМІ выполняет высокие требования по многим характеристикам. Первостепенными из них являются надежность, безопасность, задержка по времени и масштабируемость.

ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ АМІ

Выбор технологии сети связи для ИЭС требует проведения исследований. При этом сформулированы следующие характеристики, по конкретным требованиям которых следует принимать решение при выборе технологии связи в ИЭС. Для NAN в приоритетные направления исследований в области Smart Grid включены в [15] перечисленные ниже требования на сети связи и используемые ими системы АМІ. Все эти направления относятся к приоритетному исследованию по предотвращению простоев в предоставлении электроэнергии большому числу пользователей. В [6] приводятся примеры крупных аварий прекращения подачи электроэнергии миллионам пользователей немодернизированными энергосистемами в разных странах в 2003–2006 годах.

Надежность является одним из наиболее критичных требований к АМІ и определяется непрерывностью предоставляемых услуг двусторонней передачей данных. В [19] приводятся результаты изучения надежности в сетях доступа АМІ, которые включают интеллектуальные счетчики, пункты сбора данных DAP (data aggregation point) и концентраторы данных. Эти концентраторы являются главными шлюзами NAN. Данные содержат информацию об общем потреблении энергосети и характеристики поведения каждого потребителя. Они поступают из главных шлюзов NAN по магистральным сетям в WAN и далее в центр управления сетью MDMS. Центр управления позволяет оптимизировать ресурсы и повышать экономическую эффективность. С целью повышения надежности АМІ используется распределенная схема из нескольких MDMS, расположенных близко к главным шлюзам NAN. Каждый

MDMS ответственен за данные интеллектуальных счетчиков определенных HAN. Далее эти данные передаются в центральный MDMS для окончательного их анализа. Главные шлюзы NAN определены, как последняя миля сети доступа АМІ. В указанной работе [19] анализируются с точки зрения надежности АМІ следующие принятые топологии сети доступа: "дерево", "звезда", "кольцо" и mesh.

Безопасность. В многочисленных работах зарубежных и отечественных специалистов [20 и др.] отмечается, что информационная безопасность (ИБ) в ИЭС представляет особенно сложную задачу. Хотя широко используемые технологии беспроводных сетей связи могут повысить эффективность и надежность ИЭС, но они также могут создавать дополнительную уязвимость к угрозам безопасности, которые дополняют уязвимость существующих энергетических сетей, что делает ИЭС особенно уязвимой. NAN является сегментом ИЭС, содержащим большое количество данных интеллектуальных счетчиков, что требует использовать механизмы безопасности для обеспечения защиты от внешних атак и от утечки частных данных.

В [21] приводится описание угроз ИБ в каждой из компонент двух основных областей безопасности – области конечных устройств (интеллектуальный счетчик, MDMS) и области сетей связи (HAN, NAN, WAN). Одними из таких угроз являются передача и прием данных нелегитимными устройствами. Последствием может быть большой ущерб, включая прерывание выполнения важных функций. Защитой от таких угроз фальсификации данных являются механизмы: шифрования персональных данных, аутентификация для уверенности получения информации не от злоумышленника, целостность полученных данных. В [22] приводятся примеры использования протоколов маршрутизации в таких сетях. Для протокола маршрутизации AODV, используемого в ячеистой сети в АМІ, предусмотрен специальный протокол обеспечения защиты SAODV [16]. При этом отмечается, что не во всех протоколах предусмотрена защита от угроз ИБ. В работе приводятся и другие типы угроз ИБ.

В [23] анализируется угроза нарушения целостности данных потребления электроэнергии в концентраторах, куда они поступают прежде, чем будут отправлены в систему расчета данных потребления электроэнергией MDMS. Последствием является недостоверный расчет биллинга. Проблема ИБ заключается в том, что

концентраторы расположены обычно в необслуживаемых местах, что позволяет злоумышленнику реализовать угрозу. Предлагаются различные механизмы защиты, однако в [24] отмечается, что используемых в АМІ механизмов защиты от угроз безопасности оказывается недостаточно. В качестве дополнительной защиты "второго эшелона" после криптографии, аутентификации и др. используется система раннего обнаружения вторжения злоумышленника IDS (Intrusion Detection System). В АМІ имеет место несколько ограничений (такие как гетерогенные сети связи и др.), которые необходимо учитывать при проектировании и развертывании комплексной IDS.

Как отмечено выше, одной из характеристик ИЭС является перенос большого объема данных. Эти данные могут быть источником нарушения безопасности и приватности при эксплуатации критической инфраструктуры ИЭС [25]. Для АМІ характерна работа в реальном или близком к реальному режиму времени. Для этого определено расписание передачи большинства передаваемого трафика по сетям связи. Величина задержки низкоприоритетных данных HAN в АМІ находится в диапазоне 2-15 с. В NAN используются типы данных с разными временными требованиями.

Масштабируемость. Под масштабируемостью понимается способность системы или сети в ИЭС быть расширенной или модернизированной, чтобы удовлетворить возрастающий спрос на потребление электроэнергии. В работе приводятся два примера: система управления спросом DR (Demand Response) и АМІ. Управление спросом на электроэнергию DR выполняет функцию снижения потребления электроэнергии конечными потребителями в периоды пиковой нагрузки. Масштабируемость является критическим требованием для АМІ, особенно для NAN, к которым подключены тысячи устройств. Требуется, чтобы один или группа узлов могли легко подключаться и/или покидать ИЭС, сохраняя топологию и качество обслуживания (безопасность, надежность, время задержки) на приемлемом уровне.

Пропускная способность – хороший показатель для оценки характеристики передачи данных в ИЭС. Различные устройства могут иметь разные требования к пропускной способности. Например, пропускная способность интеллектуальных счетчиков может быть намного ниже, чем концентраторов данных в NAN. Для выполнения функции сбора данных интеллектуальных счетчиков в NAN требуется ширина полосы

пропускания каналов связи до 100 кбит/с. Для передачи данных по стоимости потребления электроэнергии требуется 500 кбит/с [21]. С увеличением объема генерируемых данных интеллектуальных счетчиков и других интеллектуальных устройств повышаются и требования к пропускной способности ИЭС, поэтому очень важно сбалансировать пропускную способность между основными узлами сбора данных.

Выводы

Приведенный в статье анализ требований к характеристикам сетей связи одной из основных подсистем Smart Grid – усовершенствованной инфраструктуры счета АМІ – полезен для образовательного процесса студентов кафедры "Информационная безопасность" МГТУ им. Н.Э.Баумана по дисциплинам "Системы и сети передачи данных" и "Защищенные сети связи". Представленный материал носит общий характер и относится только к АМІ. Использование в АМІ современных технологий Big Data, IoT, Cloud Computing, WSN и др., высокие требования к характеристикам сетей связи служат основанием продолжить анализ зарубежных работ по конкретным проблемам и выполнения требований к характеристикам сетей связи в Smart Grid.

Планируется проведение студентами конкретных научно-исследовательских работ по этому направлению. В первую очередь это относится к информационной безопасности. Для сетей связи в ИЭС требования к ИБ и некоторым другим показателям такие же высокие, как и для сетей связи категории специального назначения. Поэтому эти работы по ИЭС могут быть использованы в плане проводимых работ по учебно-лабораторному стенду сети передачи данных категории специального назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hossain E., Han Z., Poor H.V. Smart Grid Communications and Networking. – Cambridge: University press, 2012. 481 p.
2. JRS Reference report. Smart Grid projects in Europe: lessons learned and current Developments. 2011. 118 p.
3. JRS Scientific and policy report. Smart Grid projects in Europe: Lessons learned and current developments. 2013. 138 p.
4. Бухвольц Б.М., Стычински З.А. Smart Gridss – основы и технологии энергосистем будущего. – М.: Издательский дом МЭИ. 2017. 461 с.

5. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью, 2012. 51 с. www.fsk-ees.ru/upload/docs/
6. Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации. Распоряжение Правительства РФ от 3 апреля 2013 года 511-р (с изменениями на 29 ноября 2017 года).
7. Федеральный закон Российской Федерации "О связи" № 126-ФЗ от 7 июля 2003 года (редакция от 5 декабря 2017 года).
8. **Матвеев В.А., Бельфер Р.А., Кравцов А.В.** Анализ технологий построения сети передачи данных с высокими требованиями по информационной безопасности, надежности и задержке // *Электросвязь*. 2017. № 5. С. 46-49.
9. **Матвеев В.А., Басараб М.А., Бельфер Р.А., Кравцов А.В., Мерзляков Д.И.** Алгоритм функционирования УЛС защищенной сети ПД на базе виртуальных каналов с высокими требованиями к качеству обслуживания // *Электросвязь*. 2017. № 8. С. 57-62.
10. **Басараб М.А., Бельфер Р.А., Глинская Е.В., Кравцов А.В.** Алгоритм ПО установления коммутируемого виртуального канала на абонентском доступе имитатора сети ПД с учетом обеспечения информационной безопасности // *ПЕРВАЯ МИЛЯ*. 2017. №8. С. 64-69.
11. **Cintuglu M.H., Mohammed O.A., Akkaya K., Uluagac A.S.** A Survey on Smart Grid Cyber-Physical System Testbeds. IEEE. 2017. Communications Surveys & Tutorials. 2017. V. 19 Issue: 1. P. 446-464.
12. **Baimel D., Tapuchi S., Baimel N.** Smart grid communication technologies - overview, research challenges and opportunities. 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). 2016. С. 116-120.
13. **Alishahi M., Farhadi M., Jafari S.** and others. An efficient and light asymmetric cryptography to secure communication in smart grid. 2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE). 2017. P. 248-252.
14. **Feng Ye, Yi Qian, Rose Qingyang Hu.** Design for reliable and self-sustaining neighborhood area network in smart grid. 2015 11th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN). 2015. P. 251-254.
15. **Quang-Dung Ho, Yue Gao, Gowdemy Rajalingham, Tho Le-Ngoc.** Performance and applicability of candidate routing protocols for smartgrid's wireless mesh neighbor area networks, 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2014. P. 3682-3687.
16. **Бельфер Р.А.** Сети и системы связи (технологии, безопасность): учебное пособие по дисциплине "Сети и системы связи", электронное учебное издание ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э.Баумана", 2012. 738 с.
17. **Gowdemy Rajalingham, Quang-Dung Ho, Tho Le-Ngoc.** Evaluation of an efficient Smart Grid communication system at the neighbor area level. 2014 IEEE 11th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC). 2014. P. 426-431.
18. **Листвин В.Н., Трещиков В.Н.** DWDM-системы. - М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. 296 с.
19. **Shengjie Xu, Yi Qian, Rose Qingyang Hu.** Reliable and resilient access network design for advanced metering infrastructures in smart grid, IET Smart Grid, 2018, Vol: 1, Issue: 1. P. 24-30.
20. **Воропай И.И., Осак А.Б.** Будущие электроэнергетические системы - тенденции и проблемы // *ЭЛЕКТРО. Электроника. Электротехника. Электрическая промышленность*. 2015. № 4. С. 2-4.
21. **Sheeraz Niaz Lighari, Birgitte Bak Jensen, Dil Muhammad Akbar Hussain** and others. Attacks and their defenses for advanced metering infrastructure, 2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2014. P. 148-151.
22. **Tiago Antonio Rizzetti, Alexandre Silva Rodrigues, Bolívar Menezes da Silva** and others. 21 Security of communications on a high availability mesh network mesh applied in Smart Grids, 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). 2015. P. 1-6.
23. **Heng Chuan Tan, Kelvin Lim, Sye Loong Keoh** and others. Chameleon: A blind double trapdoor hash function for securing AMI data aggregation. 2018. P. 225-230.
24. **Weiming Tong, Lei Lu, Zhongwei Li, Jingbo Lin, Xianji Jin.** A Survey on Intrusion Detection System for Advanced Metering Infrastructure, 2016 Sixth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). 2016. P. 33-37.
25. **Wen-Long Chin, Wan Li, Hsiao-Hwa Chen.** Energy Big Data Security Threats in IoT-Based Smart Grid Communications IEEE Communications Magazine. 2017, V. 55, Issue: 10. P. 70-75.